

УДК 624.01

ОПТИМИЗАЦИЯ БЕЗБАЛОЧНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ

Лапина А. И.

Введение. На сегодняшний день оптимизация конструкций является одним из перспективных направлений строительной отрасли. Применение существующих методик оптимизации и разработка новых, позволяют снижать стоимость строительных конструкций без проведения дорогостоящих экспериментальных исследований. Современные достижения электронно-вычислительной техники, дают возможность до минимума сократить время необходимое для вычислений и значительно расширить область исследований. Сегодня в Республике Беларусь для строительства жилья все чаще используются каркасные здания с монолитными железобетонными перекрытиями. При этом исследование международного опыта проектирования таких перекрытий показывает, что вопросу их оптимизации посвящено незначительное количество работ. К основным недостаткам имеющихся работ, посвященных оптимизации монолитных перекрытий, можно отнести:

- расчет железобетонных плит по методам теории упругости, без учета их пластической работы;
- выбор критерия оптимизации, не позволяющего оценить эффективность капиталовложений в строительство и/или ущерб от вероятностного отказа конструкции;
- оценка ущерба от разрушения без учета затрат, которые целесообразно инвестировать в сохранение человеческой жизни.

Принимая во внимание выше сказанное, представляется целесообразным разработать методику оптимального проектирования безбалочных перекрытий монолитных каркасных зданий по стоимостному критерию, учитывающую эффективность капиталовложений в строительство, а также ущерб от вероятностного отказа конструкции, включающий затраты, которые целесообразно инвестировать в сохранение человеческой жизни в Республике Беларусь.

Основная часть. Рассмотрим железобетонные безбалочные бескапитальные перекрытия монолитного каркаса многоэтажного жилого здания высотой до 75 м. Каркас здания выполнен из монолитного бетона без предварительного напряжения арматуры. Все его элементы (колонны, перекрытия и диафрагмы жесткости) работают совместно по рамно-связевой схеме. Для возведения перекрытий и диафрагм каркаса использовалась крупно-щитовая опалубка, а для возведения колонн – скользящая металлическая. Армирование всех конструктивных элементов выполнено стрежневой арматурой, объединённой в вязанные сетки и каркасы.

Расчет монолитного каркаса с учетом нелинейной работы отдельных элементов является весьма трудоемкой задачей. С целью ее упрощения в качестве модели для оптимального проектирования будем рассматривать характерный элемент каркаса – многоэтажную раму, вырезанную в пределах отдельной ячейки перекрытия по линии нулевых поперечных сил (рис. 1). Отметим, что расчет характерного элемента конструкции позволяет определять основные зависимости, связывающие ее стоимостные величины и проектные параметры.

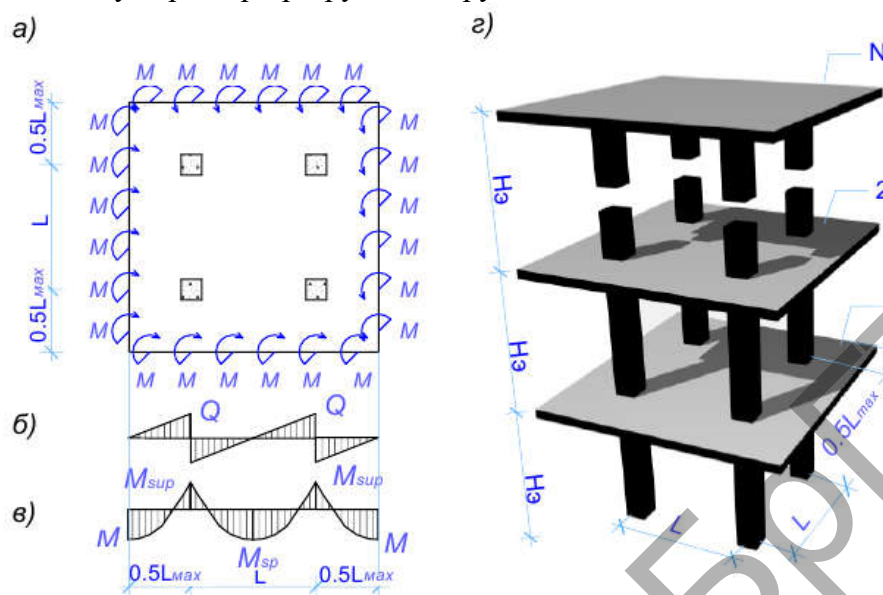
В соответствии с СТБ ISO 2394 [1] целью проектирования считается минимизация стоимости конструкций на протяжении всего срока службы, включающая затраты на создание, эксплуатацию и ликвидацию последствий вероятностного отказа конструкции. С учетом этого выбираем в качестве целевой функцией стоимость плит перекрытия и колонн на протяжении всего срока службы, приведенную к 1 м² площади здания, а в качестве критерия оптимальности назначаем минимум этой функции:

$$F() = \frac{C_b + C_m + \Sigma P_f C_f}{S} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где S – эксплуатируемая площадь расчетного участка здания, м²;

C_b – затраты на строительство, руб.;

C_m – стоимость технического обслуживания и сноса, руб.;
 P_f – вероятность разрушения в течении срока службы;
 C_f – стоимость ущерба при разрушении, руб.



а) ячейка перекрытия, вырезанная по линиям нулевых значений поперечной силы;
 б) эпюра поперечных сил; в) эпюра изгибающих моментов; г) общий вид расчетной модели
 Рисунок 1 – Модель для решения задачи оптимизации

Затраты на строительство определяем с учетом эффективности капиталовложений в основные производственные фонды и оборотные средства. Расход стали в элементах расчетной модели определяем на основании расчета по предельным состояниям несущей способности. Усилия в плите перекрытия при этом определяем по методу предельного равновесия, учитывая пластическую стадию работы плиты.

Стоимость технического обслуживания конструкции определяем на протяжении нормативного срока службы, который составляет 50 лет (табл.1 [1]).

Согласно [1], составляющая формулы (1) $\sum P_f \cdot C_f$ рассчитывается по всем формам разрушения для всех сочетаний нагрузок. Принимая во внимание, что перекрытие является несущей конструкцией и его разрушение может привести не только к уменьшению стоимости конструкции и необходимости ее восстановления, но и к гибели людей, ущерб оцениваем с учетом затрат, которые целесообразно инвестировать в сохранение человеческой жизни по формуле:

$$C_f = \Delta P \cdot K_a + P_{\min} + N_{ac} \cdot ICAF, \quad (2)$$

где ΔP – уменьшение стоимости плиты в результате полного или частичного разрушения;

K_a – коэффициент амортизации;

P_{\min} – минимальные затраты необходимые для восстановления плиты (принимаются не более чем 60% от сметной стоимости);

N_{ac} – ожидаемое количество несчастных случаев со смертельным исходом;

$ICAF$ – денежная сумма, которую экономически целесообразно инвестировать в сохранение жизни (Implied Cost of Averting a Fatality), определяется в соответствие с [2] по формуле:

$$ICAF = \frac{g \cdot e}{4} \cdot \frac{1-w}{w}, \quad (3)$$

где g – валовый внутренний продукт на душу населения

(для Республики Беларусь на 2017 г. $g = 105\,199,0$ млн. руб/ 9,505млн. чел. = 11 068руб/чел [3], [4]);

e – средняя ожидаемая продолжительность жизни (для Республики Беларусь на 2017 г. $e = 74,4$ года [5]);
 w – часть жизни связанная с экономической активностью (для развитых стран $w = 0.125$ [2]).

Вероятность разрушения в течение срока службы определяем в соответствии с [1] по формуле:

$$P_f = p(g(\underline{X}) < 0), \quad (4)$$

где $g()$ – функция предельного состояния;

\underline{X} – базисные переменные, в качестве которых будем рассматривать воздействия, свойства материалов, геометрические параметры и погрешность модели.

Базисные переменные характеризуются своим средним значением, стандартным отклонением и распределением вероятности. Основные характеристики базисных переменных указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Определение характеристик базисных переменных

Базисная переменная	Среднее значение	Стандартное отклонение	Функция распределения вероятности
Постоянные воздействия	на основании ТКП EN 1991 [6]	на основании ТКП EN 1991 [6]	нормальное распределение Гаусса
Переменные воздействия	на основании ТКП EN 1991 [6]	на основании ТКП EN 1991 [6]	нормальное распределение Гаусса
Особые воздействия	на основании ТКП EN 1991 [7]	на основании ТКП EN 1991 [7]	нормальное распределение Гаусса
Характеристики бетона	на основании СТБ EN 206-1 [8]	на основании СТБ EN 206-1 [8]	логнормальное распределение Гаусса
Характеристики арматуры	на основании СТБ EN 10080 [9]	на основании СТБ EN 10080 [9]	логнормальное распределение Гаусса
Геометрические параметры	номинальный размер	на основании ТКП 45-5.03-131 [10]	логнормальное распределение
Погрешность модели	нулевое значение	согласно исследованиям [11]	нормальное распределение Гаусса

Функцию предельных состояний находим как разность функций эффекта сопротивления и эффекта воздействия. Гистограмму плотности распределения резерва прочности (рис.2) строим на основании имитационного моделирования Монте-Карло.



■ гистограмма полученная имитационным моделированием по методу Монте Карло;
 — кривая нормального распределения Гаусса.

Рисунок 2 – Плотность распределения резерва прочности

Так как полученное распределение близко к нормальному распределению Гаусса, что подтверждается определением критерия Пирсона и внешним видом гистограммы,

вероятность отказа конструкции определяем как площадь криволинейной трапеции по формуле:

$$P_f = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{\bar{\psi}}{\sigma_{\psi}}\right), \quad (5)$$

где $\bar{\psi}$ – математическое ожидание резерва прочности;

σ_{ψ} – среднеквадратичное отклонение резерва прочности;

$\Phi(\cdot)$ – функция Лапласа.

В качестве анализируемых параметров примем геометрические размеры перекрытия и прочностные характеристики материалов (табл.2). Класс арматуры в качестве параметра оптимизации рассматривать не будем, так как проведенные исследования [12] показывают, что использование арматуры класса S500 является более выгодным, чем использование арматуры S400.

Таблица 2 – Параметры оптимизации.

Наименование	Условное обозначение	Ед. изм.
Толщина плиты перекрытия	h_{Π}	м
Пролет перекрытия	l	м
Площадь сечения колонн	S_K	м ²
Соотношение сторон сечения колонны	$k = h_{min}/h_{max}$ h_{min}, h_{max} – минимальный и максимальный размеры сечения колонны.	–
Прочность бетона колонн на сжатие	$f_{ck\Pi}$	МПа
Прочность бетона перекрытий на сжатие	f_{ckK}	МПа
Соотношения площадей арматуры в сечения плиты с пластическими шарнирами	$Q_{sup} = A_{sup}/(A_{sup} + A_{sp})$ A_{sup} – площадь арматуры в верхней части сечения; A_{sp} – площадь арматуры в нижней части сечения.	–

В качестве ограничений целевой функции рассматриваем требования, предъявляемые к железобетонным безбалочным перекрытиям монолитного каркаса многоэтажного жилого здания, согласно СТБ EN 1990 [13]. Что предусматривает проверку конструктивных требований, проверку требований предельных состояний несущей способности и эксплуатационной пригодности, проверку способности к пластическому повороту сечений с пластическими шарнирами и т.д. Также в соответствии с требованиями проектирования [14] проверяем вероятность отказа конструкции, которая для несущих конструкций жилых зданий относящихся к классу надежности RC2 должна составлять 10^{-6} (табл. С.1.[14]).

Отметим, что полученная целевая функция имеет сложную структуру и большое количество параметров и ограничений. В связи с этим, для поиска ее минимума требуется использовать методы условной глобальной многомерной оптимизации, к которым относятся метод последовательного перебора вариантов и методы случайного поиска. При этом методы случайного поиска, в отличие от метода перебора вариантов, не гарантирует нахождение глобального минимума функции, а позволяет лишь улучшить известное решение. Поэтому их применение будет целесообразным в тех случаях, когда область определения целевой функции очень велика и/или когда на вычисление ее значения уходит большое количество времени.

Так как по предварительным подсчётам, при современном уровне развития вычислительной техники, на исследование всей области определения описанной целевой функции с приемлемой для строительства точностью уйдет не более 3-х минут, то

применяем для решения данной задачи метод последовательного перебора вариантов. Алгоритм данного метода подробно описан в пособии [15] и заключается в сравнении между собой по принятому критерию оптимизации всех или некоторых, предварительно выбранных, возможных вариантов.

Далее составим алгоритм решения задачи оптимизации безбалочных перекрытий:

1. В соответствии с методом последовательного перебора вариантов задаем параметры оптимизации, перечисленные в таблице 2.

2. На основании расчета по предельным состояниям несущей способности определяем площади арматуры в расчетных сечениях.

3. Определяем вероятность отказа конструкции для всех форм разрушения, при каждом сочетании нагрузок.

4. Проверяем выполнение ограничений. Если ограничения выполнены, переходим к пункту 5. Если ограничение не выполнено, но дополнительное армирование может решить проблему, увеличиваем площади арматуры в одном или нескольких сечениях и переходим к пункту 3. Иначе – возвращаемся к пункту 1.

5. Определяем расход арматуры на колонны и перекрытия расчетной модели.

6. Определяем сметную стоимость конструкции.

7. Определяем критерий оптимизации по формуле 1. В соответствии с методом последовательного перебора вариантов, сравниваем полученное значение с предыдущими значениями критерия, если они имеются и сохраняем наилучшее решение.

8. Если все возможные варианты рассмотрены, заканчиваем работу алгоритма, иначе – переходим к пункту 1. В соответствии с методом последовательного перебора вариантов задаем параметры оптимизации, перечисленные в таблице.

Разработанную методику оптимального проектирования безбалочных монолитных перекрытий реализуем в виде компьютерной программы “ОПТИПЛИТ”. Это позволит в дальнейшем оценить влияние проектных параметров на критерий оптимизации целевой функции и разработать рекомендации по проектированию безбалочных монолитных перекрытий каркасных зданий с минимальными затратами.

Выводы:

- Разработана методика оптимального проектирования безбалочных монолитных перекрытий каркасных жилых зданий по критерию стоимости колонн и перекрытий на протяжении всего срока службы, учитывающая пластическую работу конструкций.

- Целевая функция разработанной методики оптимизации позволяет оценивать затраты на создание, эксплуатацию в течение всего срока службы и ликвидацию последствий вероятного отказа конструкции с учетом затрат, которые целесообразно инвестировать в сохранение человеческой жизни.

- В качестве параметров оптимизации приняты: толщина плиты перекрытия, пролет перекрытия, площадь сечения колонн, соотношение сторон сечения колонн, прочность бетона колонн и перекрытий; соотношения площадей арматуры в сечениях плиты с пластическими шарнирами.

- При вычислении целевой функции, учтены все ограничения, обусловленные действующими на территории Республики Беларусь международными нормами.

- Для поиска оптимального решения из множества возможных выбран метод перебора вариантов, поскольку он универсален, обладает простым алгоритмом и позволяет находить минимальное значение целевой функции за приемлемое время.

- Созданная методика оптимизации реализована в виде программного приложения, что позволит в дальнейшем оценить влияние проектных параметров на критерий оптимизации целевой функции и разработать рекомендации по проектированию безбалочных монолитных перекрытий каркасных зданий с минимальными затратами.

Список источников

1. СТБ ISO 2394-2007. Надежность строительных конструкций. Общие принципы. Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2007. 69 с.
2. JCSS-Joint Committee on Structural Safety // Probabilistic Model Code. 2001. URL: <http://www.jcss.ethz.ch/> (дата обращения: 21.03.2017)
3. Валовой внутренний продукт [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Республики Беларусь: [сайт]. [2017]. URL: www.belstat.gov.by (дата обращения: 07.18.2018).
4. Численность населения [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Республики Беларусь: [сайт]. [2017]. URL: www.belstat.gov.by (дата обращения: 07.18.2018).
5. Ожидаемая продолжительность жизни [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Республики Беларусь: [сайт]. [2017]. URL: www.belstat.gov.by (дата обращения: 07.18.2018).
6. ТКП EN 1991-1-1-2016 (33020). Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-1. Общие воздействия. Объемный вес, собственный вес, функциональные нагрузки для зданий. Мн: Министройархитектуры Республики Беларусь, 2016. 38 с.
7. ТКП EN 1991-1-7-2009 (02250). Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-7. Общие воздействия. Особые воздействия. Мн: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2010. 67 с.
8. СТБ EN 206-1-2009. Бетон. Часть 1. Требования, показатели, изготовление и соответствие. Мн: Госстандарт, 2009. 70 с.
9. СТБ EN 10080-2011 Арматура для железобетонных конструкций. Арматура сварная. Общие технические условия. Госстандарт-е изд. Мн. 2011. 139 с.
10. ТКП 45-5.03-131-2009 (02250). Монолитные бетонные и железобетонные конструкции. Правила возведения. Мн: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2009. 20 с.
11. Kennedy G., Goodchild C.H. Practical Yield Line Design – Surrey, The Concrete Center. 2004. 117 pp.
12. Давыдюк А.И. Оптимальное проектирование перекрытий монолитных зданий.// Диссертация на соискание учёной степени магистра технических наук 05.23.01. Брест. 2007. 225 с
13. СТБ EN 1990-2007. Еврокод. Основы проектирования. Мн: Госстандарт, 2007. 56 с.
14. ТКП EN 1992-1-1-2009 (02250). Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. Мн: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2010. 192 с.
15. Рекомендаций по оптимальному проектированию железобетонных конструкций. М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1981. 170 с.